

	DIN EN 60904-4 (VDE 0126-4-4)	
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	
ICS 27.160	Einsprüche bis 2009-04-30 Entwurf Photovoltaische Einrichtungen – Teil 4: Verfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit der Kalibrierung von Referenz-Solarelementen (IEC 82/533/CDV:2008); Deutsche Fassung FprEN 60904-4:2008 Photovoltaic Devices – Part 4: Procedure for establishing the traceability of the calibration of reference solar devices (IEC 82/533/CDV:2008); German version FprEN 60904-4:2008 Dispositifs photovoltaïques – Partie 4: Procédures pour établir la traçabilité de l'étalonnage des dispositifs solaires de référence (CEI 82/533/CDV:2008); Version allemande FprEN 60904-4:2008 Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2009-02-09 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten – vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen. Gesamtumfang 45 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE	

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments FprEN 60904-4:2008 „Photovoltaische Einrichtungen – Teil 4: Verfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit der Kalibrierung von Referenz-Solarelementen“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 82/533/CDV:2008 „Photovoltaic Devices – Part 4: Procedure for establishing the traceability of the calibration of reference solar devices“ unverändert in den Entwurf FprEN 60904-4:2008 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 82 „Solar photovoltaic energy systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 373 „Photovoltaische Solarenergie-Systeme“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 50	–	–
EN 60904-1	IEC 60904-1	DIN EN 60904-1 (VDE 0126-4-1)	VDE 0126-4-1
EN 60904-2	IEC 60904-2	DIN EN 60904-2 (VDE 0126-4-2)	VDE 0126-4-2
EN 60904-3	IEC 60904-3	DIN EN 60904-3 (VDE 0126-4-3)	VDE 0126-4-3
EN 60904-7	IEC 60904-7	DIN EN 60904-7	–
EN 60904-8	IEC 60904-8	DIN EN 60904-8	–
EN 60904-9	IEC 60904-9	DIN EN 60904-9 (VDE 0126-4-9)	VDE 0126-4-9
EN 60891	IEC 60891	DIN EN 60891	–
–	IEC 61836	–	–
EN ISO/IEC 17025	ISO/IEC 17025	DIN EN ISO/IEC 17025	–
–	ISO 9846	–	–
–	ISO 9059	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60904-1 (VDE 0126-4-1), *Photovoltaische Einrichtungen – Teil 1: Messen der photovoltaischen Strom-/Spannungskennlinien*

DIN EN 60904-2 (VDE 0126-4-2), *Photovoltaische Einrichtungen – Teil 2: Anforderungen an Referenz-Solarelemente*

DIN EN 60904-3 (VDE 0126-4-3), *Photovoltaische Einrichtungen – Teil 3: Messgrundsätze für terrestrische photovoltaische (PV) Einrichtungen mit Angaben über die spektrale Strahlungsverteilung*

DIN EN 60904-7, *Photovoltaische Einrichtungen – Teil 7: Berechnung des Fehlers der spektralen Fehl-anpassung, der beim Prüfen von photovoltaischen Einrichtungen entsteht*

DIN EN 60904-8, *Photovoltaische Einrichtungen – Teil 8: Messung der spektralen Empfindlichkeit einer photovoltaischen (PV) Einrichtung*

DIN EN 60904-9 (VDE 0126-4-9), *Photovoltaische Einrichtungen – Teil 9: Leistungsanforderungen an Sonnensimulatoren*

DIN EN 60891, *Verfahren zur Umrechnung von gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien von photovoltaischen Bauelementen aus kristallinem Silizium auf andere Temperaturen und Einstrahlungen*

DIN EN ISO/IEC 17025, *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*

Deutsche Fassung

Photovoltaische Einrichtungen – Teil 4: Verfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit der Kalibrierung von Referenz-Solarelementen

1 Zweck

Die vorliegende Internationale Norm legt die Anforderungen für die vorgesehenen Kalibrierverfahren zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit (der Kalibrierung) von photovoltaischen Referenz-Solarelementen auf SI-Einheiten entsprechend der in IEC 60904-2 gestellten Anforderungen fest.

2 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für photovoltaische (PV-)Referenz-Solarelemente, die zum Messen der Bestrahlungsstärke von natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht zum Zweck der quantitativen Bestimmung der Leistungsfähigkeit von PV-Einrichtungen verwendet werden. Die Verwendung eines PV-Referenz-Solarelementes wird in der Anwendung von IEC 60904-1 und IEC 60904-3 gefordert.

Diese Norm wurde mit Blick auf PV-Einfach-Referenzsolarzellen (Single-Junction-Referenzsolarzelle), insbesondere mit kristallinem Silizium, geschrieben. Der Hauptteil der Norm ist jedoch ausreichend allgemeingültig, um andere Technologien einzuschließen. Die in Anhang A beschriebenen Verfahren sind aber auf Single-Junction-Technologien beschränkt.

3 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 9846, *Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter*

ISO 9059, *Solar energy – Calibration of field pyrhelimeters by comparison to a reference pyrhelimeter*

IEC 60904-1, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurements of photovoltaic current-voltage characteristics*

IEC 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference solar devices*

IEC 60904-3, *Photovoltaic devices – Part 3: Measurements principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device*

IEC 60904-8, *Photovoltaic devices – Part 8: Guidance for the measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device*

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

IEC 60891, *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices*

IEC 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms and symbols*

IEC 50, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
ISBN 0 580 34929 2

International vocabulary of basic and general terms in metrology (IVM): BIPM/ IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/
OIML

MISC UNCERT – Ed. 1.0 (1995), *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*: BIPM/ IEC/IFCC/
ISO/IUPAC/ IUPAP/ OIML: ISO: Geneva, 1995, ISBN 92-67-10188-9

NIST Technical Note 1297 (1994), *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurements Results*

„*The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement*“, United Kingdom, Accreditation Service,
M3003, Middlesex, UK, December 1997

4 Terminologie

In diesem Abschnitt sind die verschiedenen Referenz-Messgeräte für die Rückverfolgungskette definiert. Tabelle 1 beschreibt und vergleicht diese mit den zur Zeit verwendeten Referenz-Messgeräten. Bild 1 ist eine schematische Darstellung der gebräuchlichsten Rückverfolgungsketten auf Grundlage der in Anhang A beschriebenen Verfahren.

4.1 Primärnormal

Eine Einrichtung, die eine der SI-Einheiten oder in direktem Zusammenhang stehende Größen physikalisch umsetzt. Primärnormale werden üblicherweise von Nationalen Metrologischen Instituten (NMI) oder ähnlichen Organisationen, die mit der „Pflege“ von Normalen für physikalische Größen betraut sind, bewahrt. Die physikalische Umsetzung ist so gewählt, dass Langzeitstabilität, Genauigkeit und Wiederholpräzision der Messung der Größe, die vom oft auch nur „Primär“ genannten Normal wiedergegeben wird, im höchsten Maß, das die aktuelle Technologie ermöglicht, sichergestellt ist.

ANMERKUNG Die „World Radiometric Reference“ (WRR), wie sie von der „World Standard Group“ (WSG) für Hohlraum-Strahlungsmessgeräte geschaffen wurde, ist das anerkannte Primärnormal für die Messung der solaren Bestrahlungsstärke (globalen Sonnenstrahlung).

4.2 Sekundärnormal

Eine Einrichtung, die durch regelmäßigen Vergleich mit einem Primärnormal zum Aufrechterhalten der Konformität zu SI-Einheiten an anderen Orten als dem (Standort) des Primärnormals dient. Das Sekundärnormal muss nicht unbedingt auf den gleichen technischen Prinzipien wie das Primärnormal beruhen, jedoch wird eine ähnliche Langzeitstabilität, Präzision und Wiederholpräzision angestrebt.

ANMERKUNG Typische Sekundärnormale für die solare Bestrahlungsstärke sind Hohlraum-Strahlungsmessgeräte, die regelmäßig (üblicherweise alle 5 Jahre) in den internationalen Pyrheliometer-Vergleich (IPC, International Pyrheliometer Comparison) mit der WSG einbezogen werden.

4.3 primäres Referenzelement

Das Referenzmessgerät, das ein Laboratorium zum Kalibrieren von sekundären Referenzelementen verwendet. Dieses wird in regelmäßigen Zeitabständen mit einem Sekundärnormal verglichen. Primäre Referenzelemente können oft mit viel niedrigeren Kosten realisiert werden als Sekundärnormale.

ANMERKUNG Üblicherweise wird eine Solarzelle als Referenz-Solarelement für die Messung der natürlichen oder simulierten solaren Bestrahlungsstärke verwendet.

4.4 sekundäres Referenzelement

Die für tägliche Routinemessungen oder zum Kalibrieren von Arbeitsreferenzen verwendete Messeinrichtung, die in regelmäßigen Zeitabständen gegen ein primäres Referenzelement kalibriert wird.

ANMERKUNG Die am häufigsten verwendeten sekundären Referenzelemente für die Messung der natürlichen oder simulierten solaren Bestrahlungsstärke sind Solarzellen und Solarmodule.

4.5 Rückverfolgbarkeit

Die Anforderung an jedes PV-Referenzsolarelement, dass dessen Kalibrierwert an SI-Einheiten in einer ununterbrochenen und dokumentierten Kette von Kalibrierübertragungen einschließlich angegebener Unsicherheiten gebunden ist.

ANMERKUNG Die WRR wurde zweimal mit der SI-Radiometrieskala verglichen und es wurde nachgewiesen, dass sie innerhalb ihrer (paarweisen) Kovarianzniveaus liegt. Deshalb liefert die Rückverfolgbarkeit auf WRR eine Rückverfolgbarkeit auf SI-Einheiten. Die Unsicherheit des Verhältnisses WRR/SI-Einheiten muss jedoch berücksichtigt werden. Das „World Radiation Center“ (WRC) empfiehlt eine Rechteckverteilung der Unsicherheit mit einer halben Breite (Spannweite) von 0,3 %. Ein dritter Vergleich wird derzeit vorgenommen und sollte in naher Zukunft veröffentlicht werden.

J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich *metrologia* **28** (1991) 125-8

J. Romero, N.P. Fox, C. Fröhlich *metrologia* **32** (1995/1996) 523-4

Tabelle 1 – Beispiele für Referenzmessgeräte, die in der Rückverfolgungskette für die Zeit und die Solarbestrahlungsstärke verwendet werden

Referenzmessgerät	Zeit	Solare Bestrahlungsstärke
Primärnormal	Cäsiumatomuhr am National Metrology Institute (NMI)	Gruppe von Hohlraum-Strahlungsmessgeräten, die die World Standard Group (WSG) der World Radiometric Reference (WRR) darstellen Kühlfallendetektor (-empfänger)
Sekundärnormal	Cäsiumatomuhr auf GPS-Satelliten	Handelsübliche Hohlraum-Strahlungsmessgeräte, die alle 5 Jahre beim internationalen Pyrheliometer-Vergleich (IPC) verglichen werden Normalempfänger, kalibriert gegen Trapempfänger (Empfänger in optischer Falle) Spektroradiometer, kalibriert gegen Normallampe
primäres Referenzelement	GPS-Empfänger, auf Zeitanzeige eingestellt	Pyrheliometer mit senkrechtem Einfall (NIP, en: normal incidence pyrheliometer) (ISO 9059) Referenz-Solarelement (IEC 60904-2 und IEC 60904-4)
sekundäres Referenzelement	Quarzuhr	Pyranometer (ISO 9846) Referenz-Solarelement (IEC 60904-2)

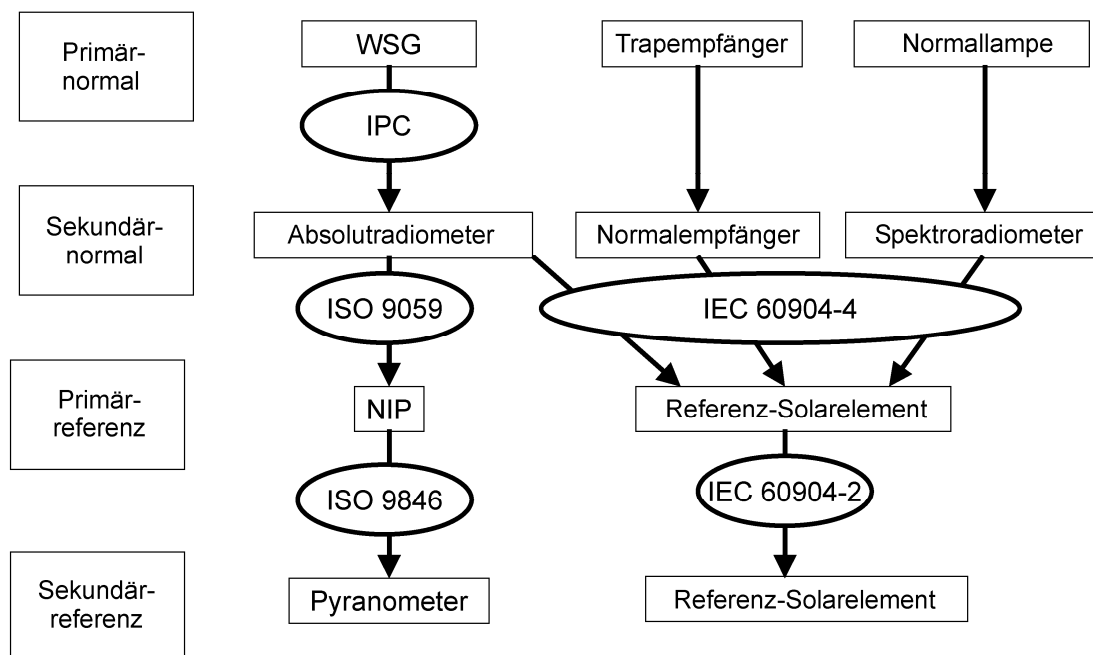


Bild 1 – Schema der in den Rückverfolgbarkeitsketten für Solarbestrahlungsempfänger am häufigsten verwendeten Referenzmessgeräte und Übertragungsverfahren; die direkte Rückverfolgbarkeit von Absolutradiometern auf die radiometrische SI-Skala kann auch gegeben sein

5 Anforderungen an die rückverfolgbare Kalibrierverfahren für PV-Referenz-Solarelementen

Ein rückverfolgbares Kalibrierverfahren ist notwendig, um die Kalibrierung von einem Solarbestrahlungs-Normal oder -Referenzgerät (z. B. Hohlraumstrahlungsmessgerät, Pyrheliometer oder Pyranometer) auf ein PV-Referenz-Solarelement zu übertragen. Die Anforderungen an derartige Verfahren sind folgende:

- jedes für das Übertragungsverfahren erforderliche und verwendete Messgerät muss ein Messgerät mit ununterbrochener Rückverfolgungskette sein;
- eine dokumentierte Unsicherheitsanalyse;
- dokumentierte Wiederholpräzision, wie z. B. Messergebnisse von Laborringversuchen (Vergleichsmessungen), oder Dokumente der Laborqualitätskontrolle;
- inhärente Absolutpräzision, gegeben durch eine begrenzte Anzahl an Zwischenübertragungen.

ANMERKUNG 1 Die Übertragung würde üblicherweise von einem Sekundärnormal auf eine PV-Referenzsolarzelle, die ein primäres Referenzelement darstellt, erfolgen.

ANMERKUNG 2 Die Übertragung von einer Referenzsolarzelle auf eine andere wird in IEC 60904-2 behandelt.

6 Unsicherheitsanalyse

Für jedes rückverfolgbare Kalibrierverfahren muss eine nach MISC UNCERT – ED. 1.0 (1995-01) vorgenommene Abschätzung der Unsicherheit bereitgestellt werden. Diese Abschätzung muss Angaben über die Unsicherheit des Kalibrierverfahrens und quantitative Angaben zu folgenden Unsicherheitsfaktoren für jedes bei der Ausführung des Kalibrierverfahrens verwendete Messgerät enthalten. Dies sind insbesondere:

- die aus Zufallseffekten entstehende Unsicherheitskomponente (Typ A);
- die aus systematischen Effekten entstehende Unsicherheitskomponente (Typ B).

Dennoch muss für die Implementierung des Kalibrierverfahrens eine vollständige Unsicherheitsanalyse durch ein bestimmtes Laboratorium durchgeführt werden

7 Kalibrierbericht

Der Kalibrierbericht hat der in ISO/IEC 17025 gestellten Anforderung zu entsprechen und muss normalerweise mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- a) Titel (z. B. „Kalibrierungszertifikat“);
- b) Name und Anschrift des Laboratoriums und Ort, an dem die Prüfungen und/oder Kalibrierungen durchgeführt wurden, falls dieser von der Anschrift des Laboratoriums abweicht;
- c) eindeutige Kennzeichnung des Berichts (z. B. eine Seriennummer) und jeder Seite, die Gesamtanzahl an Seiten und das Ausstellungsdatum;
- d) Name und Anschrift des Auftraggebers;
- e) Beschreibung und unverwechselbare Identifizierung des bzw. der geprüften oder kalibrierten Objekte;
- f) Daten des Eingangs des bzw. der Kalibrierungsobjekte und Datum bzw. Daten der Durchführung der Prüfung oder Kalibrierung entsprechend dem jeweiligen Fall;
- g) Kalibrierergebnisse einschließlich der Temperatur der Solarzelle, bei der die Kalibrierung durchgeführt wurde;
- h) Verweisung auf die vom Laboratorium angewendeten Probenahmeverfahren, wenn diese für die Gültigkeit oder Anwendung der Ergebnisse von Bedeutung sind;
- i) Name(n), Titel und Unterschrift(en) oder gleichwertige Identifizierung der Person(en), die den Bericht unterschreibt bzw. unterschreiben;
- j) falls zutreffend, einen Hinweis darauf, dass sich die Ergebnisse nur auf die geprüften oder kalibrierten Objekte beziehen.

8 Kennzeichnung

Das kalibrierte Referenz-Solarelement muss mit einer Seriennummer oder Referenznummer und den folgenden beigefügten oder als Begleitzertifikat mitgelieferten Angaben gekennzeichnet werden:

- a) Datum der (eigentlichen oder vorliegenden) Kalibrierung;
- b) Kalibrierwert und dessen Temperaturkoeffizient (falls zutreffend).

Anhang A (informativ)

Beispiele validierter Kalibrierverfahren

A.1 Einleitung

Dieser Anhang beschreibt Beispiele zu Kalibrierverfahren für PV-Referenz-Solarelemente als primäre Referenzelemente zusammen mit deren ausgewiesenen Unsicherheiten. Diese Verfahren dienen der Feststellung der Rückverfolgbarkeit von Referenz-Solarelementen auf SI-Einheiten, wie in IEC 60904-2 gefordert. Nach diesen Verfahren kalibrierte primäre Referenzelemente dienen zur Feststellung der Rückverfolgbarkeit weiterer PV-Referenz-Solarelemente.

Wie bereits im Anwendungsbereich erwähnt, sind die in diesem Anhang beschriebenen Verfahren auf die PV-Einfachzellen-Technologie (PV-Single-Junction-Technologie) begrenzt. Außerdem sind sie derzeit nur für Techniken mit kristallinem Silizium validiert worden, sie sollten jedoch auch für andere Technologien gelten.

Die Verfahren wurden weltweit in verschiedenen Laboratorien umgesetzt und in internationalen Rundvergleichsmessungen validiert, wobei die „World Photovoltaic Scale“ (WPVS) besonders zu erwähnen ist. Die Beschreibung in dieser Norm wurde jedoch verallgemeinert. Bezüglich der Einzelheiten der einzelnen Implementierungen sind am Ende jedes Verfahrens Verweisungen auf von Fachleuten begutachtete Veröffentlichungen angegeben.

Die Unsicherheitsschätzungen beruhen auf U_{95} (Erweiterungsfaktor $k = 2$) für alle einzelnen Komponenten. Die kombinierte erweiterte Unsicherheit wird als Quadratwurzel der Summe der Quadratzahlen aller Komponenten berechnet. Die angegebenen Unsicherheiten sind vereinfachte (auf Hauptkomponenten begrenzte) Versionen, wie sie vom Laboratorium, das das Verfahren umsetzte, angegeben wurden. Diese Unsicherheitsberechnungen dienen als Anleitungen und müssen auf die jeweilige Implementierung jedes Verfahrens in einem bestimmten Laboratorium abgestimmt werden. Die durch jegliche Implementierung dieser Verfahren erzielten Unsicherheiten können sich beträchtlich unterscheiden. Ausgewiesene Unsicherheiten müssen auf einer expliziten Analyse beruhen und können nicht unter Bezug auf die in dieser Norm enthaltenen Unsicherheitsschätzungen angegeben werden.

A.1.1 Beispiele validierter Verfahren

A.2 Verfahren mit globalem Sonnenlicht

A.3 Differential-Spektralempfindlichkeits-Kalibrierung

A.4 Sonnensimulator-Verfahren

A.5 Verfahren mit direkter Sonnenstrahlung

A.1.2 Liste der üblichen Formelzeichen

I_{SC}	Kurzschlussstrom der Referenzzelle
T_j	Temperatur der Referenzzelle
M_G	Bestrahlungsstärke-Korrekturfaktor (siehe unten)
M_T	Temperatur-Korrekturfaktor (siehe unten)
T_{coef}	Temperaturkoeffizient α des Kurzschlussstromes (IEC 60891), normalisiert auf den Kurzschlussstrom bei 25 °C und angegeben in 1/°C
MMF	(spektraler) Fehlanpassungsfaktor (siehe unten)
λ	Wellenlänge
$S(\lambda)$	Spektralempfindlichkeit der Referenzzelle

$s(\lambda)$	Differential-Spektralempfindlichkeit der Referenzzelle
$E_m(\lambda)$	spektrale Bestrahlungsstärkeverteilung von natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht
$E_s(\lambda)$	spektrale Normal- oder Referenz-Bestrahlungsstärkeverteilung nach IEC 60904-3
G_{dir}	Direktbestrahlungsstärke
G_{dif}	diffuse Bestrahlungsstärke in der Ebene
G_T	Gesamtbestrahlungsstärke in der Ebene
E_{STC}	Bestrahlungsstärke bei STC (= 1 000 W·m ⁻²)
CV	Kalibrierwert, d. h. ISC bei STC
AM	Luftmasse
STC	Normalprüfbedingungen (1 000 W/m ² , 25 °C and $E_s(\lambda)$)
P	örtlicher Luftdruck
P_0	101 300 Pa
θ	solarer Höhenwinkel

A.1.3 Allgemeingültige Gleichungen

Für die in A.2, A.4 und A.5 beschriebenen Verfahren gelten einige Gleichungen gemeinsam, die in diesem Unterabschnitt behandelt werden. Einzelheiten zu den verschiedenen Implementierungen werden dann in dem jeweiligen Abschnitt beschrieben.

I_{SC} wird üblicherweise nicht bei genau 1 000 W·m⁻² gemessen sondern bei einer Bestrahlungsstärke nahe diesem Wert. Unter der Annahme, dass sich I_{SC} der Referenzzelle mit der Bestrahlungsstärke linear ändert, wird folgende Korrektur vorgenommen:

$$I_{\text{SC}}(1\,000\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}) = I_{\text{SC}} \times M_G = I_{\text{SC}} \frac{1\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{G_T} \quad (\text{Gleichung A.1.1})$$

Die Normalprüfbedingungen schreiben eine Elementtemperatur von 25 °C vor, jedoch werden die Messungen nicht immer bei dieser Temperatur vorgenommen. Die Abweichungen in der Temperatur sollten beim Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden. Es ist auch möglich, I_{SC} bezüglich der Messtemperatur durch Multiplizieren mit dem Temperatur-Korrekturfaktor M_T entsprechend folgender Gleichung auf 25 °C zu korrigieren:

$$I_{\text{SC}}(25\text{ °C}) = I_{\text{SC}}(T_j) \times M_T = \frac{I_{\text{SC}}(T_j)}{1 - T_{\text{coef}}(25\text{ °C} - T_j)} \quad (\text{Gleichung A.1.2})$$

Die Korrektur der Differenz in der spektralen Empfindlichkeit zwischen der zu kalibrierenden Referenzzelle und der zum Messen der Bestrahlungsstärke verwendeten Einrichtung kann als MMF folgendermaßen wiedergegeben werden:

$$MMF = \frac{\int_{300\text{ nm}}^{4\,000\text{ nm}} S(\lambda) \cdot E_s(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300\text{ nm}}^{4\,000\text{ nm}} S(\lambda) \cdot E_m(\lambda) \cdot d\lambda} \times \frac{\int_{300\text{ nm}}^{4\,000\text{ nm}} E_m(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{300\text{ nm}}^{4\,000\text{ nm}} E_s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (\text{Gleichung A.1.3})$$

ANMERKUNG Der Integrationsbereich wurde auf Grundlage der Definition von $E_s(\lambda)$ gewählt. Wenn der Messbereich, insbesondere der von $E_m(\lambda)$, diesen Gesamtbereich nicht vollständig erfasst, kann eine geeignete Näherung, Extrapolation oder Modellierung angewendet werden, die jedoch bei der Unsicherheitsberechnung berücksichtigt werden muss.

Der Kalibrierwert CV der Referenzzelle wird dann folgendermaßen berechnet:

$$CV = I_{SC} \times M_G \times M_T \times MMF \quad (\text{Gleichung A.1.4})$$

A.1.4 Verweisungen

C. R. Osterwald et al., *The results of the PEP'93 intercomparison of reference cell calibrations and newer technology performance measurements: Final Report*, NREL/TP-520-23477 (1998) 209 Seiten.

C. R. Osterwald et al., *The world photovoltaic scale: an international reference cell calibration program*, Progress in Photovoltaics 7 (1999) 287-297.

K. Emery, *The results of the First World Photovoltaic Scale Recalibration*, NREL/TP-520-27942 (2000) 14 Seiten.

Winter et al., *The results of the Second World Photovoltaic Scale Recalibration*, PTB (2006) in Vorbereitung.

A.2 Verfahren mit globalem Sonnenlicht

Die Feststellung der Rückverfolgbarkeit beruht auf der Kalibrierung nach dem in ISO 9846 beschriebenen kontinuierlichen Sonne-Schatten-Verfahren. Die zu kalibrierende Referenz-Solarzelle wird unter natürlichem Sonnenlicht verglichen mit zwei Referenz-Strahlungsmessgeräten, d. h. ein die direkte solare Bestrahlungsstärke messendes Pyrheliometer und ein die diffuse solare Bestrahlungsstärke, erhalten unter normalen Einfallbedingungen durch Anwendung einer kontinuierlichen Abschattungseinrichtung, messendes Pyrannometer. Die solare Gesamtbestrahlungsstärke wird als Summe der direkten Bestrahlungsstärke und der diffusen Bestrahlungsstärke in der Ebene bestimmt. Als Pyrheliometer wird ein Sekundärnormal in Form eines Hohlraum-Absolutstrahlungsmessgerätes verwendet, das in Abständen von 5 Jahren mit der World Standard Group (WSG), die die World Radiometric Reference (WRR) festlegt, verglichen wird. Der Kalibrierfaktor der Photovoltaik-Referenzzelle wird aus dem gemessenen Kurzschlussstrom bestimmt, auf $1\,000\text{ W/m}^2$ umgerechnet und bezüglich der spektralen Fehlanpassung korrigiert (IEC 60904-7), die auf der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke des globalen Sonnenlichts und der relativen spektralen Empfindlichkeit der zu kalibrierenden Referenz-Solarzelle beruht.

Unter bestimmten Bedingungen ist das „vereinfachte Verfahren mit globalem Sonnenlicht“ anwendbar. Der Kurzschlussstrom der Referenz-Solarzelle wird auf $1\,000\text{ W/m}^2$ umgerechnet und dann gegen die druckkorrigierte geometrische Luftmasse aufgetragen. Der Kalibrierwert wird aus einer linearen Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate (Regressionsgerade) bei der Luftmasse 1,5 bestimmt. Eine Korrektur bezüglich der spektralen Fehlanpassung ist nicht erforderlich, da die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke des Sonnenlichts und der spektralen Empfindlichkeit nicht notwendig sind. Bei der vereinfachten Form des Verfahrens mit globalem Sonnenlicht wird keine explizite spektrale Fehlanpassungskorrektur durchgeführt, was durch Bedingungen ausgeglichen wird, die sicherstellen sollen, dass die spektrale Bestrahlungsstärke des natürlichen Sonnenlichts ausreichend nahe der definierten spektralen Normal-Bestrahlungsstärke (IEC 60904-3) ist, damit die Unsicherheitskomponente kleiner als die in Tabelle A.2.1 angegebene ist. Obwohl dies durch die in der nachfolgenden Beschreibung des Verfahrens angeführten Bedingungen sichergestellt sein dürfte, sollte es explizit nachgeprüft werden (vorzugsweise mit Hilfe des Verfahrens mit globalem Sonnenlicht). Nach dieser Validierung kann das vereinfachte Verfahren angewendet werden, solange die Grenzbedingungen die gleichen sind, wie bei der Validierung.

ANMERKUNG 1 Die Verifizierung und Validierung wird für beide Verfahren Zahlenwerte liefern. Wenn die Übereinstimmung dieser Zahlenwerte innerhalb des Unsicherheitsbudgets der Verfahren liegt, muss das vereinfachte Verfahren als validiert betrachtet werden.

ANMERKUNG 2 Das vereinfachte Verfahren liefert genaue Ergebnisse für Einrichtungen mit einer spektralen Empfindlichkeit über einen breiten Bereich des Sonnenspektrums, z. B. Solarelemente mit kristallinem Silizium. Bei Solarelementen mit schmalbandiger spektraler Empfindlichkeit können beträchtliche Fehler eingebracht werden.

A.2.1 Geräte

- a) Eine Montageplattform, die während des gesamten Kalibrierverlaufs mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ senkrecht zur Sonne ausgerichtet werden kann.
- b) Ein Hohlraum-Strahlungsmessgerät, das auf WRR rückverfolgbar ist.
- c) Ein Pyranometer, das auf WRR rückverfolgbar ist.
- d) Eine Abschattungseinrichtung zum Abschatten des in c) geforderten Pyranometers. Der aus dem Schatten resultierende Feldwinkel, Betrachtungswinkel und Aperturwinkel müssen die jeweiligen deskriptiven Winkel des in b) geforderten Hohlraum-Strahlungsmessgerätes kompensieren.
- e) Ein temperaturgeregelter Montageblock für das untersuchte Referenzelement, mit dem die Zelltemperatur während des Kalibrierverlaufs auf $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ gehalten werden kann.
- f) Rückverfolgbare Instrumente zum Messen des Kurzschlussstromes der Solarzelle mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ oder besser.
- g) Rückverfolgbare Instrumente zum Messen des Signals des Pyranometers mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ oder besser.
- h) Ein Spektroradiometer, mit dem die spektrale Bestrahlungsstärke der natürlichen Gesamtsonnenstrahlung in der Ebene im Wellenlängenbereich von 350 nm bis 2 500 nm (oder breiter) gemessen werden kann.

ANMERKUNG 1 Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich.

- i) Apparatur zum Bestimmen der relativen spektralen Empfindlichkeit der Referenz-Solarzelle.

ANMERKUNG 2 Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich.

- j) Mittel zum Messen der Sonnenhöhe auf $\pm 2^\circ$. Alternativ dazu kann die Höhe der Sonne während der Datenerfassung aus Jahrbüchern entnommen oder berechnet werden, solange die Präzisionsanforderung für den jeweiligen Zeitpunkt der Datenerfassung eingehalten wird. Letzteres erfordert üblicherweise rückverfolgbare Mittel zum Messen der Zeit für die Berechnung der Luftmasse.

ANMERKUNG 3 Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich.

- k) Ein Manometer zum Messen des örtlichen Luftdrucks P mit einer Genauigkeit von $\pm 250\text{ Pa}$ oder besser.

ANMERKUNG 4 Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich.

A.2.2 Messungen

Eine Kalibrierung nach dieser Norm muss an klaren, sonnigen Tagen ohne sichtbare Bedeckung durch Wolken innerhalb von 30 Grad der Sonne durchgeführt werden.

- a) Die relative spektrale Empfindlichkeit der zu kalibrierenden Referenzzelle ist zu bestimmen.

ANMERKUNG 1 Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich.

- b) Der Ort und/oder die Jahreszeit sind so auszuwählen, dass sichergestellt ist, dass die Sonne im Verlauf des Tages eine Höhe mit einem Winkel erreicht, der AM 1,5 ($41,8^\circ$ bei P_0) entspricht.
- c) Das Hohlraum-Strahlungsmessgerät ist auf der Sonnenausrichtungsplattform (A.2.1, Listenpunkt a)) anzubringen. Die erhältlichen Strahlungsmessgeräte haben ihre eigene Elektronikeinheit, die an das Messgerät entsprechend den Herstellerempfehlungen angeschlossen werden muss. Der Elektronikeinheit ist ausreichend Zeit zum Stabilisieren einzuräumen.
- d) Die zu kalibrierende Referenz-Solarzelle ist planparallel auf der Montageplattform zu setzen und am Montageblock anzubringen und die Zelltemperatur ist auf $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ zu halten.
- e) Das zum Messen der diffusen solaren Bestrahlungsstärke vorgesehene Pyranometer ist planparallel auf der Montageplattform anzubringen. Es ist sicherzustellen, dass innerhalb des (effektiven) Messfelds des Pyranometers keine reflektierenden Oberflächen die Messergebnisse beeinflussen können.

Die Abschattungseinrichtung ist anzubringen, wobei sicherzustellen ist, dass die empfindliche Fläche des Pyranometers in Richtung des Mittelpunkts der Abschattung zeigt.

- f) Das Spektroradiometer ist planparallel auf der Montageplattform anzubringen.

ANMERKUNG 2 Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich.

- g) Es sind Simultanmesswerte entsprechend folgenden Schritten zu nehmen:

- 1) Die ordnungsgemäße Ausrichtung aller Messgeräte in Bezug auf die Sonne und die der Abschattungseinrichtung ist sicherzustellen.
- 2) Es ist sicherzustellen, dass die Temperatur der Referenz-Solarzelle innerhalb der in d) vorgegebenen Grenzen liegt.
- 3) Für die direkte normale Bestrahlungsstärke G_{dir} ist der Anzeigewert des Hohlraum-Strahlungsmessgerätes aufzuzeichnen.
- 4) Für die diffuse Bestrahlungsstärke in der Ebene, G_{dif} , ist der Anzeigewert des Pyranometers aufzuzeichnen.
- 5) Der Kurzschlussstrom I_{SC} der zu kalibrierenden Referenz-Solarzelle ist aufzuzeichnen.
- 6) Die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ des globalen natürlichen Sonnenlichts ist aufzuzeichnen.

ANMERKUNG 3 Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich.

- 7) Es ist der solare Höhenwinkel θ zu messen oder es sind die Stunde, Minute und Sekunde (Uhrzeit) der Datenerfassung aufzuzeichnen und die Sonnenhöhe zu berechnen.

ANMERKUNG 4 Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich.

- 8) Der örtliche Luftdruck P ist zu messen.

ANMERKUNG 5 Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich.

- 9) Die Schritte 1 bis 6 sind mehrmals zu wiederholen.

ANMERKUNG 6 Für das vereinfachte Verfahren nicht erforderlich.

- 10) Die Schritte 1 bis 5, 7 und 8 sind mindestens jede 5 Minuten für mehrere Stunden vor und nach dem Sonnenzenit zu wiederholen, wobei der Luftmassenbereich von unter AM 1,5 bis über AM 3,0 in beiden Zeitspannen überstrichen werden muss.

ANMERKUNG 7 Nur für das vereinfachte Verfahren erforderlich.

- h) Das gesamte Messverfahren ist an mindestens zwei weiteren Tagen zu wiederholen.

A.2.3 Datenanalyse

Auf alle erfassten Datenpunkte sind folgende Schritte in angegebener Reihenfolge anzuwenden:

- a) Die Datenpunkte, bei denen G_{dir} , G_{dif} oder I_{SC} im Vergleich zum vorherigen Datenpunkt um mehr als 3 % abweicht, sind zu verwerfen.
- b) Die Gesamtbestrahlungsstärke ist mit $G_{\text{T}} = G_{\text{dir}} + G_{\text{dif}}$ zu berechnen.
- c) Der gemessene Kurzschlussstrom I_{SC} der zu kalibrierenden Referenz-Solarzelle ist nach Gleichung A.1.1 auf $1\,000\text{ W/m}^2$ umzurechnen.
- d) Die Temperatur ist nach Gleichung A.1.2 zu korrigieren.

ANMERKUNG 1 Dies ist normalerweise nicht erforderlich, da die Temperatur entsprechend der Beschreibung in A.2.2 d) aufrechterhalten wird und die zulässige Temperaturabweichung im Unsicherheitsbudget berücksichtigt wird.

- e) Bezüglich der spektralen Fehlanpassung muss eine Korrektur nach Gleichung A.1.3 vorgenommen werden, wobei $E_{\text{m}}(\lambda)$ die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke des globalen natürlichen Sonnenlichts ist.
- f) Der Kalibrierwert ist nach Gleichung A.1.4 zu berechnen.
- g) Von allen an einem Tag erhaltenen Kalibrierwerten ist der Mittelwert zu bilden, um CV_1 zu erhalten.